

# Lumen vaikutus aurinkopaneelien toimintaan Pohjoismaissa

Pro gradu -tutkielma, 25.6.2020

Tekijä:

ALEKSI HULKKONEN

Ohjaaja:

JUSSI MAUNUKSELA



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
FYSIIKAN LAITOS

© 2020 Aleksi Hulkkonen

Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty. This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

## Tiivistelmä

Hulkkonen, Aleksi

Lumen vaikutus aurinkopaneelien toimintaan Pohjoismaissa

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2020, 35 sivua

Lumi vaikuttaa aurinkopaneelien tuotantoon ja jo parin senttimetrin kerros juuri satanutta lunta voi pudottaa paneelin saavuttamaa säteilymäärää merkittävästi. Tällöin paneelin tuottama energia voi tippua yksittäisen kuukauden osalta jopa 90 %. Tässä tutkimuksessa arvioidaan PVGIS-simulaatio-ohjelman ja lumitilastojen avulla lumen vaikutuksia aurinkopaneelien tuottamaan energiaan. Tarkastelussa keskitytään Pohjoismaiden alueelle ja pyritään arvioimaan lumen vaikutuksen suuruutta vuosituotantoon paneelin teknisen iän aikana, mikä on noin 25-30 vuotta. Paneelin teknisellä iällä tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka aikana paneelin pitäisi pystyä tuottamaan vähintään 80 % sen nimellistehosta.

Säteilymäärien simulointiin jouduttiin käyttämään kahta eri tietokantaa, niiden alueellisten rajoitusten takia. Tietokantojen välillä on noin 10 % ero, jonka takia eri kaupunkien väliset säteilymäärät eivät kaikki ole keskenään vertailukelpoisia.

Keskimäärin Pohjoismaissa vuotuinen simuloitu säteilymäärä on 1130 kWh/m<sup>2</sup>, josta lumen takia menetetään noin 25 %. Tämä kasvattaa kehyksettömän yksikiteisestä piistä valmistetun aurinkopaneelin valmistukseen tarvittavan energian takaisinmaksuaikaa 4,1 vuodesta 5,5 vuoteen. Tanskassa, Kööpenhaminassa vuotuisen säteilymäärä on keskimäärin noin 1261 kWh/m<sup>2</sup>, josta lumen takia menetetään noin 9 %. Muualla Pohjoismaissa säteilymäärä vaihtelee 984 kWh/m<sup>2</sup> (Jyväskylä) ja 1231 kWh/m<sup>2</sup> (Vaasa) välillä, ja lumen takia menetetty säteilymäärä vaihteli 15 % ja 32 % välillä. Näin ollen lumen ehkäisemisellä saadaan merkittävä hyöty paneelin sähköntuotantoon.

Avainsanat: Aurinkopaneeli, Auringon säteily, uusiutuva energia, lumi, Pohjoismaat



## Abstract

Hulkkonen, Aleksi

Effect of snow on the productivity of solar panels in Northern countries

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2020, 35 pages.

Snow affects to the energy production of solar panels and even a couple centimetre layer of freshly fallen snow can reduce the amount radiation that a panel receives 90 % at duration of a month. This study uses PVGIS-simulation and statistics of snow downfall to evaluate the effects of snow on energy output. This research focuses on the Nordic countries and aims to assess the impact of snow on annual production during the technical period of the panel, which is about 25-30 years. The technical period is the time during which the production capacity of the solar panel maintains 80 % of its nominal output.

Two different databases were used to simulate the amounts of radiation, due to regional limitations. There is an approximately 10 % difference between the databases, which is why the amounts of radiation between different cities are not all comparable.

In the other Nordic countries, the average amount of simulated radiation is 1130 kWh/m<sup>2</sup>, varying between 984 kWh/m<sup>2</sup> (Jyväskylä) and 1231 kWh/m<sup>2</sup> (Vaasa). On average, the annual loss of radiation is approximately 25 %. Based on these results, snow increases the repayment period of monocrystalline silicon panel from 4.1 to 5.5 years. In Denmark (Copenhagen) the average annual radiation is approximately 1261 kWh/m<sup>2</sup>. Due to snow it decreases about 9 %. So it would be important to prevent the snow downfall on the solar panel.

Keywords: Solar panel, solar radiation, renewable energy, snow, Northern countries



## Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>9</b>
<b>2 Taustatietoa aurinkopaneeleista</b>	<b>13</b>
2.1 Auringon säteily aurinkopaneelilla . . . . .	13
2.2 Aurinkopaneelien toiminta . . . . .	14
<b>3 Lumi ja aurinkopaneelit</b>	<b>17</b>
3.1 Lumen vaikutus aurinkopaneeleihin . . . . .	17
3.2 Lumen vaikutuksen minimointi . . . . .	18
<b>4 Aurinkopaneelien tekninen potentiaali Suomessa</b>	<b>21</b>
<b>5 Lumen vaikutus aurinkopaneeleihin Pohjoismaissa</b>	<b>23</b>
<b>6 Johtopäätökset</b>	<b>31</b>
<b>Lähteet</b>	<b>35</b>





# 1 Johdanto

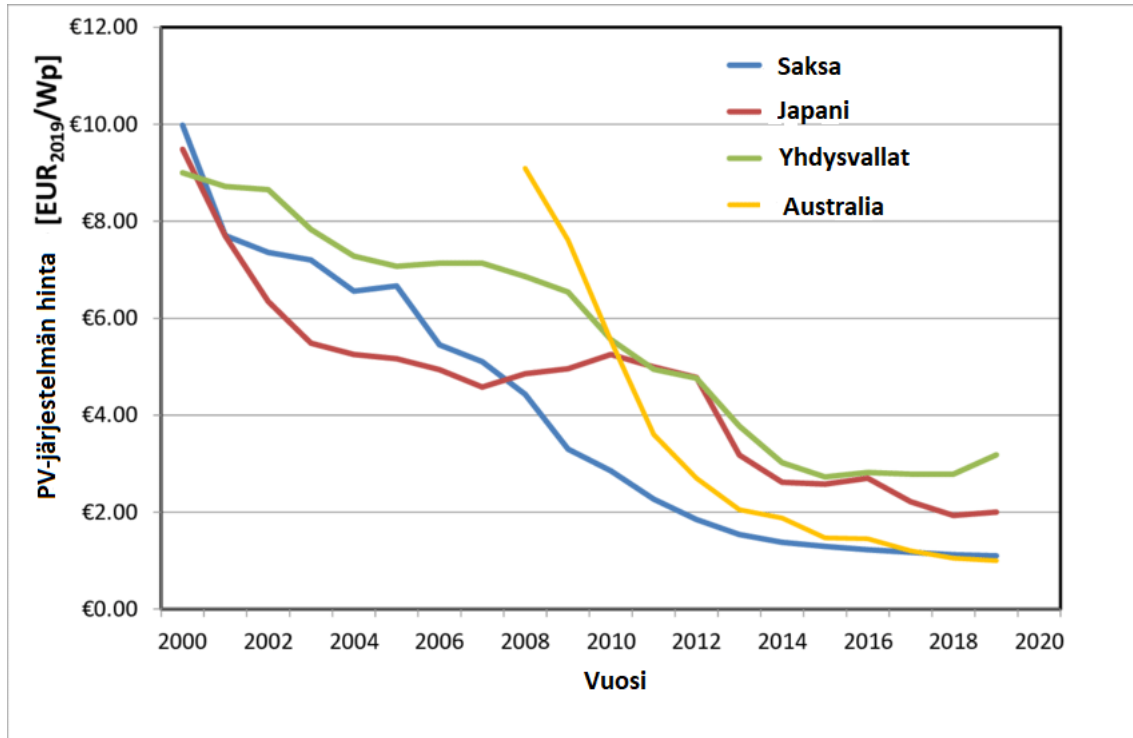
Maaailman energian tarve kasvaa jatkuvasti, minkä lisäksi fossiilisten polttoaineiden poltolla on huono vaikutus ilmastoon, eikä niitä loputtomiin riitä. Näin ollen on ollut jatkuvaa pyrkimystä kehittää uusia ja tehokkaampia tapoja tuottaa uusiutuvaa energiaa. Eräs paljon potentiaalia omaava uusiutuvan energian lähde on aurinko, jonka säteilystä voidaan tuottaa energiaa esimerkiksi aurinkokennojen avulla. [1]

Aurinkokennot perustuvat valosähköiseen ilmiöön, jossa auringonsäteily aiheuttaa puolijohteeseen sähkövirran. Ilmiön löytäjänä pidetään ranskalaista fyysikkoa Edmond Becquerelia, joka julkaisi vuonna 1839 tutkimuksensa auringon säteilyn vaikutuksesta pariston jännitteeseen [2]. Vuonna 1883 yhdysvaltalainen Charles Edgar Fritts rakensi ensimmäisen toiminnallisen aurinkokennon seleenistä. Kuitenkin todellinen läpimurto, joka mahdollisti nykyaikaisten tehokkaiden aurinkopaneelien kehittämisen, tapahtui vasta 1950-luvulla. Tällöin yhdysvaltalainen tutkimuskeskus Bell Labsin tutkija Daryl Chapin valmisti Calvin Fullerin ja Gerald Pearsonin kanssa maailman ensimmäisen aurinkokennon. [1]

Ensimmäisen piipohjaisen aurinkopaneelin hinta oli 300 \$/Wh [3]. Vuonna 1973 syttynyt öljykriisi kannusti monet valtiot panostamaan uusiutuvaan energian ja ydinvoimaan, mutta aurinkoenergian osalta tuotannon kehitystä vaikeutti vielä kuitenkin niiden korkea hinta [4]. Aurinkopaneeliteollisuuden merkittävin kasvu alkoi 1990-luvulla, jolloin mm. Saksa ja Japani toimeenpanivat suunnitelmansa aurinkopaneelien lisäämisestä [5].

Aurinkopaneelien hinta on pudonnut paljon ensimmäisiin paneeleihin verrattuna. Erityisesti viime vuosikymmeninä aurinkosähköjärjestelmien ja paneelien hinnat ovat pudonneet voimakkaasti (kuva 1). Kuitenkin vuosien 2004 ja 2008 välisenä aikana hinta pysyi lähes vakiona, mihin vaikutti kaksi merkittävää asiaa. Ensinnäkin tällöin Saksan ja Espanjan aurinkoenergia markkinoilla oli merkittävää laajenemista, ja maissa oli käytössä sähkötariffit, joilla valtiot pyrkivät edistämään uusiutuvaa energiaa takaamalla tuottajalle tietyn hinnan. Toiseksi samaan aikaan oli valmistukseen tarvituista piikiekoista pulaa, mikä rajoitti piikennojen tuotantoa ja vaikeutti hintakilpailua. Väliaikainen pula piistä kuitenkin mahdollisti kehittyneempien piikiekkojen

tuotantoteknologioiden, ohutkalvollaisten aurinkomoduulien ja uusien teknologioiden, kuten rikastuskonseptien tulo markkinoille paljon nopeammin kuin muutama vuosi aiemmin oli odotettu. Uudet teknologiat ja piin pulan helpottuminen lisäsivät uusien investointien määrää alalla, mikä aiheutti ylitarjontaa. Sen seurauksena vuosien 2008 ja 2012 välissä paneelien hinta romahti 80 prosenttia, mikä tuotti monille alan yrityksille merkittäviä talousvaikeuksia.[5]



**Kuva 1.** Aurinkojärjestelmän hinnan kehitys Saksassa, Yhdysvalloissa, Japanissa ja Australiassa parin viime vuosikymmenen aikana. Vuosina 2007-2010 Japanissa tapahtunut hinnan nousu johtuu valuutta kurssien muutoksesta, ja paikallisessa valuutassa hinta laski tänäkin aikana. Kuva lähteestä [6].

Aurinkosähkö- eli PV-järjestelmien (eng. photovoltaic) hinta on laskenut paneelien hinnan mukana, mutta lasku on ollut hitaampaa. Kun vielä vuonna 2008 moduulien osuus järjestelmän hinnasta oli jopa 70 prosenttia, niin se oli tippunut vuoteen 2018 mennessä alle 30 prosenttiin. Huolimatta siitä, että PV-järjestelmän laitteistokomponentit ovat maailmanlaajuiset, asennettujen PV-järjestelmien hinnat vaihtelevat edelleen huomattavasti riippuen koosta, asennustyyppistä ja maasta, jossa se on asennettu. [5]

Aurinkopaneelien hinnan laskiessa, niiden taloudellinen kannattavuus parani ja

ne pystyivät tuottamaan voittoa myös alueilla, joissa auringon valoa ei ole niin paljoa tarjolla. Pelkän vuotuisen säteilymäärän lisäksi on huomioitava, että säteilyn on päästävä paneelille asti. Eräs paneelia osittain tai mahdollisesti kokonaan varjostava asia on lumi. Aurinkopaneelit ovat kannattavimpia alueille, joissa on eniten auringon valoa vuoden aikana. eikä näillä alueilla yleensä vuotuiset lumimäärät ole merkittäviä. Mutta paneelien hinnan laskeminen on mahdollistanut paneelien kannattavuuden myös aluilla, joissa on pimeä ja kylmä talvi, kuten Suomessa. Tällöin on olennaista miettiä, pienentääkö talven lumi paneelin vuosituotantoa merkittävästi ja jos estää, niin mitkä ovat järkevät tavat ehkäistä lumen jääminen paneelille. [7]

Lumen vaikutusten arvioinnissa on monia haasteita, kuten tarkkojen pitkän-ajansääennusteiden tekeminen ja erilaisten lumi tyyppien hyvinkin erilaiset tekniset ominaisuudet. Paneelien tekninen ikä on kuitenkin hyvin pitkä, joten yksittäisen vuoden merkitys paneelin energian kokonaistuotantoon ei ole niin merkittävä. Tekninen ikä on aika, jonka jälkeenkin valmistaja takaa laitteen täyttävän tekniset toimivuusvaatimuksensa. Aurinkopaneeleille tämä tarkoittaa, että ne tuottavat vielä 25 vuoden jälkeen 80 % niiden nimellistehosta [8].

Johtuen paneelien pitkästä teknisestä iästä ei ole väliä, vaikka sääennusteiden epätarkkuus vaikeuttaa lyhyen aikavälin kannattavuuden arviointia. Tämän vuoksi kokonaistuotannon kannalta ei yksittäisellä vuodella ole välttämättä suurta merkitystä ja on perusteltua käyttää keskimääräisiä arvoja, niin lumen määrälle kuin säteilymäärälle ja ”talven” kestolle, eli ajalle, jolloin lunta on. Paneelien pinnalle päätyvää säteilyä rajoittaa absorptio lisäksi lumen korkea albedo eli heijastuvuus. Albedo on suurimmillaan vasta sataneessa pakkaslumessa ja absorptio kasvaa plusasteisessa lumessa, koska tällöin lumi on tiivistyneempää. Lumen eri laaduista ja siitä mihin aikaan vuodesta yleensä on millaistakin lunta, tarvitaan lisää tutkimuksia, jotta lumen vaikutusta voidaan paremmin arvioida, mutta tämän tutkimuksen tarkoitus on antaa karkea arvio asiasta. [7]

Tässä tutkimuksessa tarkoituksena on tarkastella, kuinka suuri on lumen vaikutus aurinkopaneelien vuosituotantoon Pohjoismaissa, ja tarkastella millä keinoilla ja milloin lumen puhdistus voisi olla järkevää. Tarkastellaan olemassa olevan tilastotiedon perusteella paljonko paneeleilla olisi mahdollista tuottaa energiaa, jos niille ei pääsisi kertymään yhtään lunta. Sekä paljonko ne tuottavat nykyisillä lumen poisto menetelmillä, tai jos lunta ei poistettaisiin ollenkaan. Jos lumen poistamisella saadaan suuri hyöty, niin on entistä tärkeämpää kehittää lumen poistomenetelmiä.



## 2 Taustatietoa aurinkopaneeleista

Tässä luvussa käsitellään aiempiin tutkimuksiin ja kirjallisuuteen perustuvaa taustatietoa aiheeseen. Aluksi lyhyt johdatus auringon säteilyyn, jonka jälkeen käsitellään yleisesti aurinkopaneeleita.

### 2.1 Auringon säteily aurinkopaneelilla

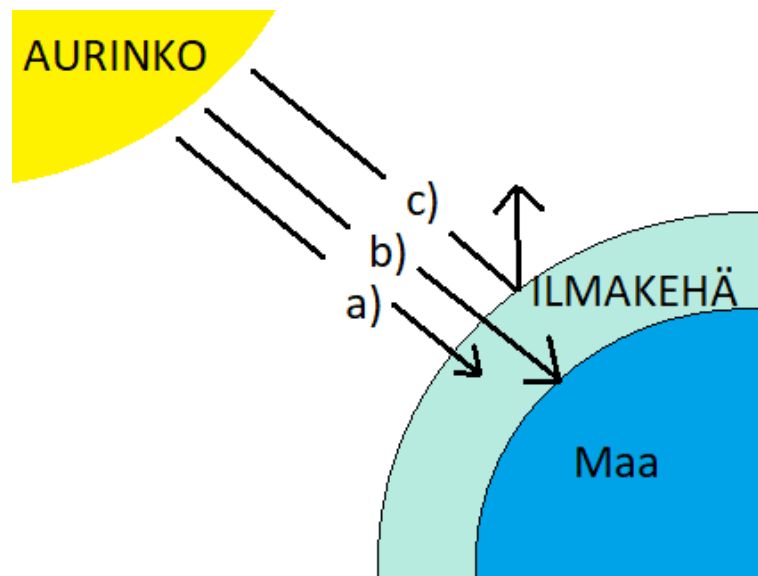
Auringon säteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka välittäjähiukkaset ovat fotoneita. Fotonit ovat valonnopeudella liikkuvia hiukkasia, joita havaitsemme nähdäksemme. Fotoni voi törmätessään atomiin siirtää siihen energiansa eli absorboitua. Tämä tapahtuu, jos atomissa on energiatilojen välillä fotonin energiaa vastaava ero, jolloin atomi virittyy. [9]

Nykyajan käsityksen mukaisesti valo käyttäytyy sekä sähkömagneettisen aallon että hiukkasen tavoin. Valoa voidaan kuvata yhtälön

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

avulla, missä  $E$  on taajuudella  $f$  tai aallonpituudeltaan  $\lambda$  olevan fotonin energia. Yhtälössä  $h$  on Planckin vakio ja  $c$  valonnopeus tyhjiössä. [10]

Auringon säteily sen pinnalta ja näin ollen myös säteily määrä ilmakehän ulkopinnalla ovat melkein vakioita. Tämä ilmakehään tuleva säteily määrä on 1366,1  $W/m^2$  [10], mutta johtuen maan ilmakehästä maanpinnalle saapuva säteily vaihtelee voimakkaasti. Yksinkertaisin arvio maanpinnan säteilylle pilvettömältä taivaalta saadaan arvioimalla ilmakehä homogeeniseksi. Suurin säteily määrä tulee kohtaa, jossa aurinko on suoraan yläpuolella. Tällöin matka ilmakehässä on lyhyimmillään. Muille sijainneille matka ilmakehässä on pidempi ja suurempi osa säteilystä absorboituu. Säteily voidaan jakaa suoraan auringosta tulevaan komponenttiin ja diffuusoituneeseen komponenttiin, joka heijastuu ilmakehän hiukkasista. Pilvettömältä taivaalta säteilystä noin 70 % pääsee suoraan maan pinnalle ja n. 7 % siroaa ilmakehästä maahan. Lopusta säteilystä n. 3 % heijastuu ilmakehästä takaisin ja n. 18 % absorboituu ilmakehään (kuva 2). Auringosta paneelille tulevan säteilyn määrää pienentää pilvisyys, ilmansaasteet ja paneelin pinnalla olevat epäpuhtaudet, kuten lumi. [10]



**Kuva 2.** Auringon säteilystä pilvettömällä taivaalla a) n. 18 % absorboituu ilmakehään, b) n. 77 % absorboituu maan pinnalle ja c) n. 3 % heijastuu takaisin avaruuteen

Aurinkopaneelit ovat yleensä asennettu vinoon kulmaan, jotta maksimoidaan paneeliin osuvan säteilyn määrä. Tämä kulma on riippuu paljon leveyspiiristä. Näin ollen on tarpeellista arvioida säteilyä tähän kulmaan nähden. Yleensä paneeli asennetaan osoittamaan viistosti etelään, jolloin saadaan suurin mahdollinen hyöty auringonsäteilystä. Jossain tapauksissa paneeli on kannattavinta asentaa, johonkin muuhun asentoon. Esimerkiksi katolle asennettaessa, tämä tapahtuu yleensä katon suuntaisesti.[10]

## 2.2 Aurinkopaneelien toiminta

Usein aurinkokennoissa käytetään piitä. Pii on puolijohde, joka on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine heti hapen jälkeen. Lisäämällä piihin pieniä määriä sopivaisia epäpuhtauksia, kuten fosforia siitä saadaan n-tyypin puolijohde. Tällaisissa n-tyypin puolijohteissa on ylimäärä vapaita elektroneja. Toisaalta lisäämällä piihin toisenlaista epäpuhtautta, kuten booria, siitä saadaan p-tyypin puolijohde, eli siinä on alijäämä vapaita elektroneja. Yhdistämällä p- ja n-tyypin puolijohteet saadaan pn-rajapinta, jossa n-puolen vapaat elektronit liikkuvat satunnaisliikkeen vaikutuksesta p-puolelle. Tämän seurauksena rajapinnalle muodostuu jännite ero, joka pyrkii kuljettamaan elektronit takaisin n-puolelle. Näin ollen rajapintaan muodostuu poten-

tiaalivalli, joka vastustaa virtaa kulkemasta toiseen suuntaan, mutta sallii liikkeen toiseen suuntaan.[1]

Valosähköisen ilmiön takia aurinkopaneelin pn-rajapinnan ylie muodostuu sähkövirtaus auringonvalon osuessa rajapintaan. Ollessaan oikealla aaltopituudella, auringonvalon fotonit voivat siirtää energiansa, jollekin materiaalin elektronille. Tällöin elektroni virittyy korkeammalle viritystilalle, jolloin elektronit ovat vapaampia liikkumaan materiaalin atomien välillä aiheuttaen sähkövirran. Liikkuessaan elektronit jättävät aukkoja siihen mistä ovat lähteneet, ja tähän aukkoon voi siirtyä uusi elektroni. Fotonin osuessa liitoksen lähellä olevaan elektroniin se voi virittyä, jolloin se pääsee virtaamaan jännite eron takia n-puolelle. Jos järjestelmä liitetään ulkoiseen piiriin, elektronit pääsevät virtaamaan n-puolelta virtapiiriä pitkin p-puolelle, jolloin syntyy virta. Energiaa tuottamiseen tarvittava virta syntyy pn-rajapinnan jännite-erosta. [1]

Varsinkin aikaisemmin suurin osa aurinkokennoista valmistettiin yksikiteisestä piistä, josta saadaan hyvinkin tehokkaita aurinkokennoja johtuen sen piiatomien järjestelmällisestä rakenteesta [10]. Kuitenkin, koska yksikiteisten piilevyjen valmistaminen on kallista ja prosessi on hidas, uusia materiaaleja on kehitelty. Muita materiaaleja on esimerkiksi monikiteinen pii, josta on helpompi ja halvempi rakentaa piilevy, mutta niiden tehokkuus on yleensä heikompi. Tehokkuutta saadaan kuitenkin parannettua prosessoimalla materiaalia. Muita vaihtoehtoja ovat mm. käyttää gallium-arseenia (GaAs) tai ohutkalvoja.[1]

Paneelin tuotanto luonnollisesti heikentyy, jos se on osittain tai kokonaan peitetty. Osittainen varjostuminen aiheuttaa lisäksi paneeliin sisäisen virran, joka voi myös vahingoittaa paneelia. Tarkasteltaessa osittain varjostettua paneelia, sen tyypillä on suuri merkitys tuotantoon, mutta tämän lisäksi myös paneelin valmistustekniikalla on merkittävä merkitys, joka voi vaikuttaa jopa 10 % vuosituotantoon. [11] Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan keskitytä erilaisten paneelien eroihin, vaan tutkitaan ilmiötä yleisemmin. Paneelin varjostuksessa on huomioitavaa, että paneeli lakkaa tuottamasta energiaa, jos nimellinen tuotanto putoaa alle 1 %. Tämä johtuu siitä, että invertteri, joka muuntaa paneelin tuottaman tasavirran vaihtovirraksi, tarvitsee sen verran energiaa. [12]

Paneelin valmistukseen kulutettu energia on hyvä vertailukohta, kun arvioidaan lumen vaikutusta paneelin sähkön tuotantoon. Esimerkiksi kehyksettömän piistä valmistetun ohutkalvo moduulin valmistukseen tarvitaan noin 120 kWh/m<sup>2</sup>. Vastaavasti

tarvitaan noin  $420 \text{ kWh/m}^2$  monikiteisen piimoduulin ja  $600 \text{ kWh/m}^2$  yksikiteisen piimoduulin valmistamiseen. Lisäksi kehykseen ja asennukseen tarvittavien osien valmistukseen menee noin  $120 \text{ kWh/m}^2$ . [13]

Kaupallisessa käytössä olevat piiaurinkopaneelit pystyvät hyödyntämään noin 24 % saamastaan säteilystä, mutta kehitystyö pyrkii nostamaan tätä kohti paneelin teoreettista maksimia, joka on 29 % [14]. Piistä valmistetun aurinkopaneelin lämpötilan laskiessa sen hyötysuhde paranee noin 0,3 % jokaista astetta kohden [9].



## 3 Lumi ja aurinkopaneelit

Luvussa tarkastellaan lumen vaikutusta paneeleihin ja vaikutuksen pienentämisen eri vaihtoehtoja perustuen aiempiin tutkimuksiin. Luvussa pyritään antamaan hyvä yleiskäsitys lumen vaikutuksesta aurinkopaneelien tuotantoon, jonka perusteella tämän tutkimuksen lumen vaikutuksen arviointi suoritetaan.

### 3.1 Lumen vaikutus aurinkopaneeleihin

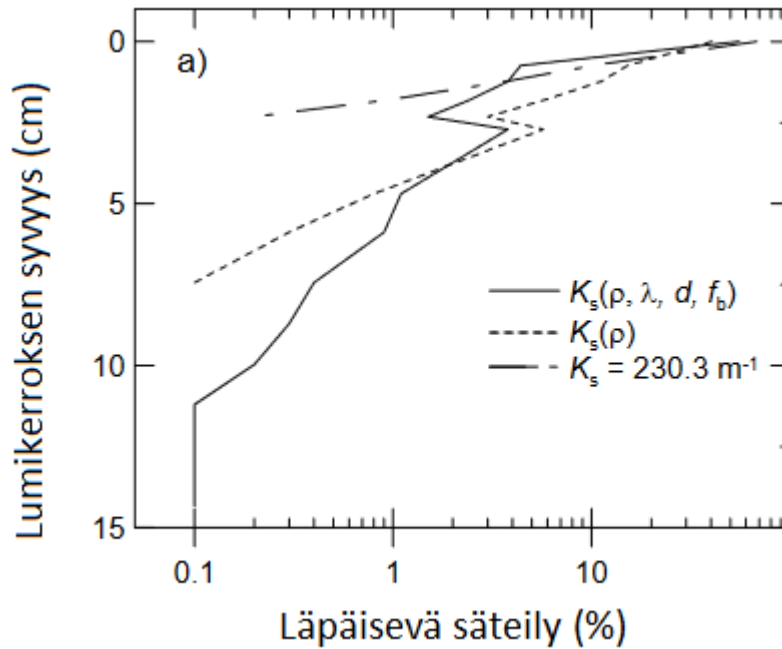
Lumi estää säteilyä pääsemästä paneelille heijastamalla sitä ja absorboimalla sitä. Absorptio riippuu lumen määrästä, mutta heijastuminen ei merkittävästi, sillä esimerkiksi mustan levyn päällä olevan lumikerroksen heijastuvuus on lähes yhtä suuri, riippumatta onko kerros 2 cm tai 10 cm. Tällöin noin 80 % valosta heijastuu pois. [15]

Moni tekijä vaikuttaa lumen vaikutuksen suuruuteen, kuten lumen laatu ja määrä, jotka vaihtelevat vuosittain, sekä paneelin kulma ja pääseekö lumi valumaan paneelilta vapaasti vai kertyykö se alareunaan. Yhdysvalloissa Kaliforniassa tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että lumi voi aiheuttaa jopa noin 12-18 % energiahäviön vuositasolla [16].

Pohjoisessa loivalla kulmalla saadaan suurin hyöty kesän auringon säteilystä. Kuitenkin jyrkemällä kulmalla paneeli tuottaa paremmin talvella, koska aurinko paistaa matalammalta ja mahdollinen lumi liukuu helpommin pois. Lisäksi tällöin paneelin tuotanto jakautuu tasaisemmin koko vuodelle. Paneelin kulmalla on merkitystä lumen aiheuttamaan tuoton vähenemiseen. Truckeessa, Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että vuotuinen energiahäviö tippui 18 %:sta jopa 3 prosenttiyksikköä kun paneelin kulmaa nostettiin vaakatasosta 24°:seen. Vuosituotanto nousi 3 prosenttiyksikköä lisää, kun kulma nostettiin 39°:seen. [17]

Lumen vaikutuksesta on myös tehty mallinnuksia. Esimerkiksi Fierz ym. tutkivat erilaisia mallinnuksia säteilyn läpäisykyvystä lumikerroksessa ja vertailivat näitä lumikerroksen lämpötilaan [18]. Kuvassa 3 nähdään kolme eri mallinnusta säteilyn käytöksestä lumikerroksessa. Mallinnukset antavat hieman eroja säteilyn määrälle,

mutta kaikissa 90 % säteilystä absorboituu ensimmäisen senttimetrin matkalla. Näin ollen jo pieni määrä lunta pysäyttää paneelin sähköntuotannon lähes kokonaan.



**Kuva 3.** Kolme eri mallinnusta säteilyn käyttäytymisestä lumikerroksessa.  $K_S = 230.3 \text{ m}^{-1}$  on yksinkertainen mallinnus, jossa lumen absorptiokerroin  $K_S$  approksimoidaan vakiona,  $K_S(\rho)$  on mallinnus, jossa huomioidaan lumen tiheys ja  $K_S(\rho, \lambda, d, f_b)$  yleisemmin käytetty mallinnus, joka huomioi myös valon aallonpituuden ( $\lambda$ ), lumen hiukkaskoon ( $d$ ). Lisäparametri  $f_b$  huomioi muita läpäisyvyyteen vaikuttavia tekijöitä, kuten lumen elektromagneettisia ominaisuuksia. Kuva lähteestä [18].

### 3.2 Lumen vaikutuksen minimointi

Lunta voi talven aikana sataa paljonkin, jonka takia lumisille alueilla on olennaista miettiä, miten lumen pysyminen paneelilla ehkäistään. Paneelit saattavat olla talvella pitkiäkin aikoja tuottamatta energiaa, koska jo osittain lumen peitossa oleva paneeli, menettää paljon tehoa. Tämän vuoksi pyritään lumen kerääntyminen ehkäisemään mahdollisimman tehokkaasti. Seuraavaksi tarkastellaan erilaisia menetelmiä poistaa lunta, sekä niiden tehokkuutta ja käytännöllisyyttä. Lumen poistamisesta paneeleilta on vain vähän tutkimuksia, mutta jäänpoistoa on kuitenkin tutkittu liittyen muihin

tarkoituksiin, kuten lentokoneen siipiin ja tuulimyllyihin.

Tuuliturbiinien lapojen jäänpoisto perustuu kahteen päästrategiaan: jäänestoon ja jäänpoistoon, jotka voidaan edelleen jakaa passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Monet näistä jäänestotavoista eivät sovellu kuitenkaan paneeleihin, johtuen suuresta riskistä vahingoittaa paneeleja tai suuren energian kulutuksen takia. Esimerkiksi lentokoneen siivissä pääpaino jäänpoistossa on turvallisuudessa, mutta paneeleissa tavoitteena on pieni energian kulutus. Jäänesto nesteet eivät ole järkeviä, koska ne voivat syövyttää pintaa, ne ovat kalliita ja yleensä ympäristölle haitallisia.[19]

Paneelien tapauksessa on tärkeää pieni energian kulutus ja mekaanisten vaurioiden minimointi, joten parhaita keinoja jäänpoistoon ovat termiset tavat ja erikoispinnoitteet. Esimerkiksi koneellinen lumen puhdistus aiheuttaa herkästi paneeleja suojaavan lasin hajoamisen. Lumen ehkäisyyn aurinkopaneelin pinnalla on haastavaa kehittää täysin toimivaa erikoispinnoitetta, koska sopivissa olosuhteissa vesi voi osuessaan paneelin pintaan jäätyä heti. Aurinkopaneelin pintaan sopivaa jäätä täydellisesti hylkivää pinnoitetta ei markkinoilla vielä ole, koska käyttökohde antaa monia rajoitteita pinnoitteelle, kuten sen että pinnoitteen pitäisi päästää auringonsäteily lävitseen. [19]

Toimivan pinnoitteen löytämiseksi Andrews ja Pierce vertailivat neljää vettä hylkivää pinnoitetta, määrittääkseen onko näillä tavallista lasia parempi lunta hylkivä ominaisuus. He käyttivät hydrofobista pinnoitetta, hydrofiilista pinnoitetta, prisma-lasia ja tavallista lasia. Pinnoitteista ei kuitenkaan saatu positiivista tulosta lumen poistumiseen ja ne jopa joissain tapauksissa estivät lumen irtoamista. [20]

Termisen jään ja lumen poistamisen voi toteuttaa palauttamalla paneelin tuottamaa sähköä takaisin paneelin ja näin lämmittämällä paneelia [21]. Toinen vaihtoehto on käyttää erillistä lämmitintä, joka asennetaan paneelin takapuolelle [19]. Molemissa tavoissa pyritään aiheuttamaan lumivyöryn paneelin pinnalle sulattamalla lumikerroksen pohja. Mittausten ja havaintojen perusteella paneelin tuottaman sähköön palauttamine paneelin läpi olisi kuitenkin edullisempi ja käytännöllisempi menetelmä lumen poistamiseksi verrattuna lämmitin käyttöön. On huomattava, että palautetun virran määrä ei saa ylittää paneelin kapasiteettia, jotta vältetään mahdolliset paneelin vauriot. [19]

Lämmitettäessä paneelia lumen poistamiseksi, paneelin pinnan lämpötila pysyy sulatusprosessin aikana lähellä sulamispistettä ( $0^{\circ}\text{C}$ ), kunnes lumikerros sulaa tai liukuu pois paneelilta. Kuitenkin kun paneeli on puhdas lumesta, paneelin lämpötila

nousee nopeast. Tästä syystä paneelin lämmittämisessä muodostuu ongelma, kun paneelin yläosa on puhdas lumesta ennen paneelin alaosaa, jolloin yläosa kuumenee tarpeettomasti. Paneelin päälle voi myös muodostua jääsilta, joka johtaa paneelin lämpötilan paikalliseen kasvuun. Tämä on huolestuttavaa, koska korkeammat lämpötilagradientit voivat aiheuttaa lämpöjännityksiä, jotka voivat aiheuttaa paneelin tai lämmittimen rikkoutumisen ajan kuluessa. Lisäksi on huomioitavaa, että sulanut lumi voi jäätyä uudelleen osuessaan kehykseen, jos kehystä ei lämmitetä. Tämän seurauksena PV-paneelien lumenpoiston kannalta kehyksetön paneeli voi olla hyödyllinen. Paneelin lämmittämisessä on myös se ristiriita, että se kuluttaa sitä energiaa mikä on tarkoituksena tuottaa. [19]

Lumi voi jäädä paneelin päälle myös kitkan ansiosta, jos paneelin kulma ( $\beta$ ) on liian loiva. Jotta lumi liukuisi paneelin pinnalta, lumeen kohdistuvan gravitaatiovoiman ( $F_s = mg \sin \beta$ ) pitää olla suurempi kuin kitkavoiman ( $F_f = \mu mg \cos \beta$ ). Yhtälöissä  $m$  on lumen massa ja  $g$  putoamiskiihtyvyyys. Liukuakseen lumen kitkakerroimelle ( $\mu$ ) pitää päteä kulman yhtälönä ehto ( $\mu < \tan \beta$ ). [22] Lumen ja paneelin välisestä kitkakertoimesta on vain vähän tietoa ja se riippuu paljon lumen tyypistä. Jonkinlaisen kuvan asiasta tarjoa esimerkiksi suksiteollisuus, missä on todettu, että puisen suksen ja märän lumen välinen kitkakerroin on 0,14. Tällöin minimikulma lumen liukumiselle olisi 8 astetta. Tämä vastaa kokeellista tulosta, jossa märkä lumi liukui harvemmin pois, jos kulma paneelin kulma on 10 astetta tai alle. [22]

Lumen poiston tutkimuksessa ja siitä luoduissa malleissa heikkoutena on niiden soveltaminen muualle. Keinojen tehokkuus ja niistä johtuvat haitat voivat vaihdella voimakkaastikin riippuen ympäristöstä ja alueen ilmastosta. Tämän vuoksi tarkan kuvan saamiseksi voi olla tarpeellista saada paikallista tutkimusta.

## 4 Aurinkopaneelien tekninen potentiaali Suomessa

Tarkasteltaessa lumen vaikutusta aurinkopaneelin vuosituotantoon Suomen olosuhteissa, on huomioitavaa myös valon määrän vaihtelu eri vuodenaikoina. Esimerkiksi Keski-Suomessa pysyvä lumipeite on vuosina 1981-2010 kestänyt keskimäärin marraskuun lopusta huhtikuun loppuun [23]. Valoa on kuitenkin loppu syksystä ja talvella vain vähän, joten lumen vaikutus on tällöin pieni. Suurempi vaikutus lumella onkin kevät kuukausina, jolloin päivän pituus on alkanut kasvaa, mutta lumi ei ole vielä ehtinyt sulamaan. Toisaalta lumella voi olla myös positiivinen vaikutus paneelien tuotantoon. Jos paneelit saadaan pidettyä puhtaana lumesta, voi ympäristön lumi heijastaa paneeleille lisää säteilyä. Lisäksi paneelin lämpötilan laskiessa sen hyötysuhde kasvaa [1].

Viistolle talon katolle paneelit asennetaan yleensä katon suuntaisesti. Näin asennus on helpointa toteuttaa, ja on helpompaa huomioida katon kestävyys ja paneeleilta alas liukuvasta lumesta johtuvat haitat. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kuitenkin paneeleja energian tuotannon kannalta, jolloin paneelien kulma optimoidaan säteilyn mukaan. Huomioitavaa on, että kesällä optimaalinen kulma on loivempi ja talvella kun aurinko paistaa keskipäivälläkin matalalta se on jyrkempi. Talvella lisäksi jyrkkä kulma edistää paneelin päällä olevan lumen liukumista, joten haluttaessa tuottaa mahdollisimman paljon energiaa talvella, on jyrkkä kulma parempi. [7]

Vaikka aurinko on hyvä uusiutuvan energian lähde, Finsolar-hankkeen raportissa on mietitty myös paneelien taloudellista tuottoa. Omakotitalossa omaan käyttöön tuottaessa paneelien tuottama energia vähentää suoraan verkosta ostettavan sähkön määrää ja sen rahallisena tuottona voidaan pitää sen tuottaman sähkön määrän sähkönhintaa. Ylijäämä sähköä on mahdollista myydä sähköverkkoon, mutta myyntihinta on ostohintaa alhaisempi ja näin sen taloudellinen tuotto on pienempi. [7]

Parhaan taloudellisen hyödyn takaamiseksi kannattaa omakotitaloon hankittu aurinkojärjestelmä mitoittaa niin, että kesällä saataisiin kulutettua lähes kaikki energia itse, jolloin sähköä ei tarvitse myydä verkkoon. Tämä siksi, että kesällä pidempi päivä

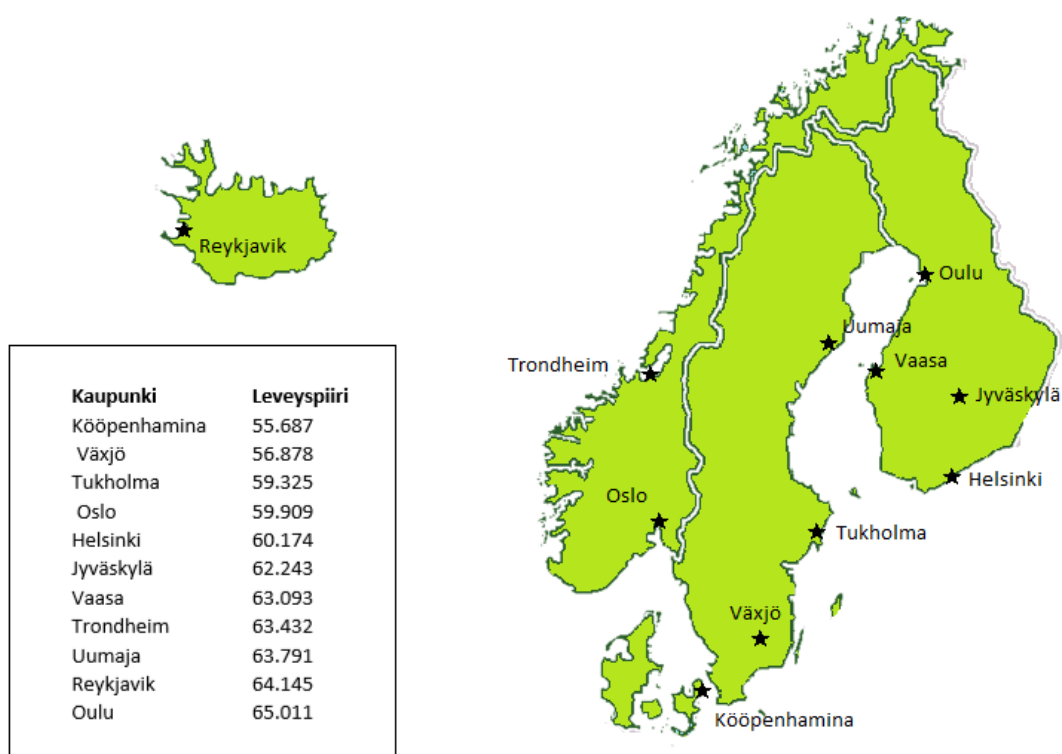
tuottaa yleensä enemmän energiaa ja toisaalta mm. vähäisemmän lämmityksen ja valaisun tarpeen vuoksi, energian kulutus on pienempi. Kerta hankinnaksi järjestelmän hinta on Suomessakin melko korkea (1000 MWh maksaa 10 000 €), ja vaikka paneelit tuottavat itsensä niiden teknisen käyttöiän aikana takaisin, on takaisinmaksuaika merkittävän pitkä (10-15 vuotta). Kuitenkin, jos aurinkopaneelijärjestelmää miettii pitkän aikavälin ja pienen riskin sijoituksena, jossa on kohtalaisen hyvä tuotto, on niiden hankkiminen perusteltua. [7, 23]

Aurinkoenergian markkinoiden potentiaalista Suomessa on tehty kattava arvio Aaltoyliopiston Finsolar-hankkeessa. Hankkeessa arvioitiin, että aurinkoenergialla on hyvä sähköntuotantopotentiaali Suomessa ja kansainvälisestä markkinakasvusta johtuva hyvä vientipotentiaali. Selvityksessä todettiin, että seuraavan 20 vuoden aikana energiaan investoidaan satoja miljardeja euroja, josta suurin osa kohdentuu aurinkoenergiaan. [7]

Suomi on pohjoisesta sijainnistaan huolimatta hyvää aluetta aurinkoenergian tuottamiseen, koska paneelit asennetaan vinosti etelään kohti aurinkoa. Pohjoisen sijainnin takia säteily kuitenkin painottuu kevästä syksyyn, eikä jakaudu tasaisesti koko vuodelle. Siksi aurinkoenergia tarvitsee ympärilleen muitakin energia muotoja. [7]

## 5 Lumen vaikutus aurinkopaneeleihin Pohjoismaissa

Luvussa käsitellään simulaation tuloksia, sekä arvioidaan Pohjoismaiden kuukausittaisten säteilymäärien ja lumitilastojen avulla paneelien puhdistamista ja sen tuomaa hyötyä. Tutkimuksessa tarkastellaan kaupunkreja ympäri Pohjoismaita mahdollisimman kattavan kokonaiskuvan saamiseksi. Paneeleilla on käyttöä myös harvemmin asutulla alueella ja erityisesti suurempia paneelivoimaloita voi olla helpompaa rakentaa syrjäisemmille alueille, mutta tässä tutkimuksessa keskitytään suurempiin kaupunkeihin tarkempien lumitilastojen takia. Tarkasteluun sisällytetyt kaupungit ovat Helsinki, Jyväskylä, Vaasa, Oulu, Tukholma, Uumaja, Växjö, Oslo, Trondheim, Kööpenhamina ja Reykjavik (kuva 4).



**Kuva 4.** Karttaan merkityille kaupungeille määritettiin vuotuiset säteilymäärät.

Maanpinnalle saapuvasta säteilymäärästä eri alueille on erilaisia mallinnuksia, mutta tässä työssä käytetään Euroopan yhteisen tutkimuskeskuksen JRC:n (eng. Joint Research centre) simulointi työkalua (PVGIS) [24]. Simuloinnissa on käytetty työkalun suosittelemia tietokantoja, jotka ovat SARAH-tietokanta sen kattamalta alueelta, ja muuten ERA5-tietokanta. SARAH on Riihelä ym. mukaan melko tarkka Suomen ja Ruotsin alueella, ja sen virhe esimerkiksi kesän osalta on noin 5 %. Se ei kuitenkaan kata Euroopan pohjoisia osia, joten on tarpeen käyttää myös ERA5-tietokantaa. [25]

Tarkasteluun sisällytetyt kaupungit leveyspiirin mukaan, niiden vuosittaiset säteilymäärät ja säteilyn määrittämiseen käytetty tietokanta on listattu taulukkoon 1. Paneelin kulma koko vuoden tuotannon maksimoimiseksi on määritetty simulointiohjelman omalla optimoinnilla. Simuloinnissa käytetään jokaiselle sijainnille optimaalista kulmaa, koska se on se kulma, johon paneelit pyrittäisiin oikeassa tilanteessa asentamaan. Vertaillen taulukon 1 säteilymääriä huomataan, että Vaasassa ERA5-tietokanta antaa leveyspiiriin nähden huomattavasti suuremman säteilymäärän, kuin SARAH-tietokanta antaa Jyväskylässä. Tämän vuoksi vertailin neljälle kaupungille vuotuisen säteilymäärän molemmilla tietokannoilla. Tulokset on esitetty taulukossa 2, josta nähdään, että ERA5-tietokanta antaa noin 10 % suurempia arvoja. Simuloinneissa on käytetty jokaiselle kaupungille parasta käytössä olevaa tietokantaa. Tämä tarkoittaa Pohjoismaiden osalta SARAH:a niiden kaupunkien osalta, joille se on mahdollista.



**Taulukko 1.** Tutkittavat kaupungit leveyspiirin mukaan, niiden vuosittaiset säteilymäärät, säteilyn määrittämiseen käytetty tietokanta ja simuloinnissa käytetty paneelin optimaalinen kulma. Kulman määrittämiseen on käytetty simulaation omaa optimointia, joka maksimoi vuotuisen säteilymäärän.

Kaupunki	Leveyspiiri	Pituuspiiri	Säteily määrä vuodessa (kWh/m <sup>2</sup> )	Paneelin kulma (°)	Tietokanta
Kööpenhamina	55.687	12.567	1261,5	41	SARAH
Växjö	56.878	14.805	1119,9	40	SARAH
Tukholma	59.325	18.071	1173,5	43	SARAH
Oslo	59.909	10.724	1130,5	44	SARAH
Helsinki	60.174	24.947	1124,8	42	SARAH
Jyväskylä	62.243	25.747	983,8	42	SARAH
Vaasa	63.093	21.606	1231,1	48	ERA5
Trondheim	63.432	10.392	1102,0	49	ERA5
Uumaja	63.791	20.289	1221,3	48	ERA5
Reykjavik	64.145	-21.948	1093,1	49	ERA5
Oulu	65.011	25.469	1111,7	48	ERA5

**Taulukko 2.** ERA5- ja SARAH-tietokantojen koko vuoden säteilymäärän vertailu

Kaupunki	Säteily vuodessa, SARAH (kWh/m <sup>2</sup> )	Säteily vuodessa, ERA5 (kWh/m <sup>2</sup> )	Suhteellinen ero ((ERA5-SARAH)/SARAH) (%)
Tukholma	1173	1300	10,8
Oslo	1130	1249	10,5
Helsinki	1125	1281	13,9
Jyväskylä	984	1071	8,9

Jokaisen kaupungin kuukausittaiset säteilymäärät simuloitiin lumen vaikutusten arviointia varten (taulukko 3). Tämän lisäksi jokaisen tutkitun kaupungin lumipeitteen tulo- ja lähtöpäivät määritettiin Weather Spark - sääpalvelun [26] avulla (taulukko 4). Palvelussa on kerätty vuosilta 1980-2010 erilaisia säätilastoja maiden sääasemilta ja tehty niistä mallinnuksia. Lumipeitteen tulo- ja lähtöpäivät on koottu taulukkoon 4.

**Taulukko 3.** Tutkittavien kaupunkien simuloidut kuukausittaiset säteilymäärät lumen vaikutuksen arviointia varten (kWh/m<sup>2</sup>).

Kaupunki	Tammikuu	Helmikuu	Maaliskuu	Huhtikuu	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu	Syyskuu	Lokakuu	Marraskuu	Joulukuu
Kööpenhamina	28	46	107	153	174	170	175	152	124	78	33	21
Växjö	21	38	97	141	159	159	156	136	105	65	26	17
Tukholma	19	39	102	146	164	168	170	144	114	66	27	16
Oslo	19	40	99	133	157	167	157	137	111	66	28	15
Helsinki	15	28	85	130	174	172	181	151	100	59	19	10
Jyväskylä	10	31	91	107	154	154	161	133	83	44	12	4
Vaasa	14	44	120	154	182	182	178	153	113	65	19	8
Trondheim	18	52	110	140	161	143	145	132	99	69	25	7
Uumaja	12	45	120	155	181	175	175	153	114	68	19	5
Reykjavik	14	51	102	137	170	150	154	133	92	65	22	4
Oulu	8	39	116	154	171	166	164	139	93	51	11	1

**Taulukko 4.** Tutkittavien kaupunkien lumipeitteen tulo- ja lähtöpäivät. Tilastot ovat keskiarvoja vuosilta 1980-2016. [26]

Kaupunki	Pysyvän lumipeitteen tulopäivä	Pysyvän lumipeitteen lähtöpäivä	Lumisten päivien lukumäärä
Kööpenhamina	5.12.	12.3.	98
Växjö	7.11.	30.3.	144
Tukholma	10.11.	3.4.	145
Oslo	22.10.	22.4.	183
Helsinki	29.10	16.4.	170
Jyväskylä	10.10.	30.4.	203
Vaasa	19.10.	24.4.	188
Trondheim	19.10.	25.4.	189
Uumaja	12.10.	29.4.	200
Reykjavik	24.10.	25.4.	184
Oulu	6.10.	28.4.	205

Lumipeitteestä johtuvan säteilyn määrittämiseksi tarvittiin lumipeitteen tulo ja lähtö kuukausien osalta menetetty säteily. Tämän määrittämiseksi latasin jokaiselle kaupungille PVGIS-järjestelmän tuntikohtaisen säteilymäärän koko vuodelle. Tästä määritin taulukossa 5 esitetyt menetetyt säteilyt lumen tulo ja lähtö kuukausille laskemalla näiden kuukausien osalta sen ajanjakson säteilyn, kun on lunta.

**Taulukko 5.** Lumen tulo ja lähtö kuukaudet ja niissä menetetty säteily

Kaupunki	Lumen tulo kk	Lumen tulo kk menetetty säteily (kWh/m <sup>2</sup> )	Lumen lähtö kk	Lumen lähtö kk menetetty säteily (kWh/m <sup>2</sup> )
Kööpenhamina	Joulukuu	17	Maaliskuu	23
Växjö	Marraskuu	20	Maaliskuu	74
Tukholma	Marraskuu	20	Huhtikuu	9
Oslo	Lokakuu	13	Huhtikuu	98
Helsinki	Lokakuu	3	Huhtikuu	60
Jyväskylä	Lokakuu	22	Huhtikuu	107
Vaasa	Lokakuu	15	Huhtikuu	122
Trondheim	Lokakuu	18	Huhtikuu	107
Uumaja	Lokakuu	36	Huhtikuu	148
Reykjavik	Lokakuu	16	Huhtikuu	105
Oulu	Lokakuu	39	Huhtikuu	141

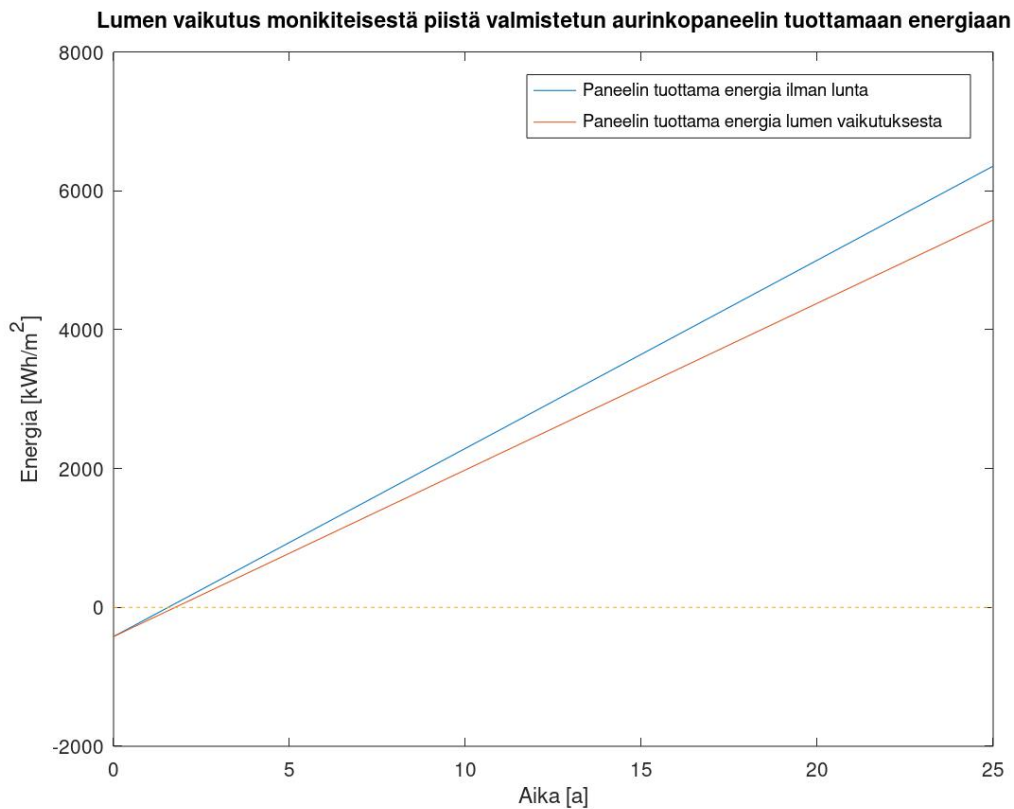
Tässä tutkimuksessa lumen vaikutus on arvioitu pahimman skenaarion mukaisesti, siten että lumi pysäyttää paneelin energian tuotannon kokonaan. Tämä ei täysin vastaa oikeaa tilannetta, jossa paneeli pystyy tuottamaan pienen määrän energiaa ohuen lumikerroksen läpi. Kuitenkin jo 1 cm kerros lunta pudottaa paneelin tuottamasta energiasta 90 % ja talvella on suurimman osan aikaa tätä enemmän lunta. Tämän vuoksi on perusteltua arvioida, että paneeli ei tuota energiaa lumisen ajanjakson aikana. Yhdistämällä taulukossa 4 esitettyihin lumitilastoihin taulukoiden 1 ja 5 säteilytilastot saadaan taulukossa 6 esitetyt lumesta johtuvat säteilyn menetykset. Havaitaan, että erityisesti pohjoisempana lumen vaikutus nousee hyvinkin merkittävään osaan ja menetetty säteily voi olla lähes kolmannes paneelin vuotuisesta potentiaalista. Taulukosta 6 huomataan, että tappio säteilyssä on merkittävää myös jo Kööpenhaminassa.

**Taulukko 6.** Lumen vaikutuksesta johtuva säteilyn menetys ja sen suhteellinen osuus koko vuoden säteilystä.

Kaupunki	Säteily vuodessa (kWh/m <sup>2</sup> )	Lumen takia menetetty säteily	
		(kWh/m <sup>2</sup> )	prosentteina (%)
Kööpenhamina	1261	114	9
Växjö	1120	170	15
Tukholma	1173	205	15
Oslo	1130	312	28
Helsinki	1125	220	20
Jyväskylä	984	277	28
Vaasa	1231	342	28
Trondheim	1102	337	31
Uumaja	1221	385	32
Reykjavik	1093	314	29
Oulu	1112	355	32

Edellä lämpötilan vaikutus paneelin hyötysuhteeseen on jätetty kokonaan huomiotta, koska sen vaikutus paneelin energiantuotantoon on pieni. Vaikutus kuitenkin lisää paneelin puhdistamisen kannattavuutta, koska talvella ympäristön lämpötila on kesää viileämpi. Suuruusluokaltaan ero talven ja kesän välillä on kuitenkin vain prosenttien luokkaa, joten sen merkitys on suhteellisen pieni. [9]

Säteilyn potentiaali Pohjoismaissa on keskimäärin noin 1130 kWh/m<sup>2</sup>, josta paneeli hyödyntää noin 24 %, eli 271 kWh/m<sup>2</sup>. Säteilystä menetetään lumen takia keskimäärin 25 % eli paneeli saa säteilyä 850 kWh/m<sup>2</sup>. Tästä paneeli pystyy hyödyntämään 240 kWh/m<sup>2</sup>. Kehyksellisen ohutkalvo paneelin valmistus energian takaisinmaksuaika pitenee 0,9 vuodesta 1,2 vuoteen ja yksikiteisen kehyksettömän paneelin tapauksessa aika pitenee 2,2 vuodesta 3,0 vuoteen. Vastaavasti monikiteisen paneelin takaisinmaksuaika pitenee 1,6 vuodesta 2,1 vuoteen (kuva 5) [13]. Jos monikiteinen kehyksetön paneeli kestää 25 vuotta, se tuottaisi ilman lunta lähes 16,6 kertaa sen valmistukseen tarvittun energian, mutta lumen vaikutuksesta luku tippuu 12 kertaan.



**Kuva 5.** Lumen vaikutus monikiteisestä piistä valmistetun paneelin tuottamaan energiaan, kun paneelin valmistukseen tarvittu energia on huomioitu. Arvo on keskimäärin Pohjoismaissa

Lumipeitteen tulo- ja lähtöpäivät vaihtelevat kuitenkin vuosittain. Esimerkiksi Jyväskylässä lumipeitteen tulo ajankohta on vuosien 1981 ja 2010 välillä vaihdellut välillä 19.9.–28.11. [23]. Tämän vaihtelun seurauksena syksyllä voidaan saada  $45 \text{ kWh/m}^2$  enemmän tai  $30 \text{ kWh/m}^2$  vähemmän säteilyä. Vastaavasti lumen lähtöpäivä vaihtelee välillä 27.2-13.5. [23], mikä tarkoittaa säteilyssä  $200 \text{ kWh/m}^2$  enemmän tai  $70 \text{ kWh/m}^2$  vähemmän. Syksyn osalta lumen tulopäivän vaihtelusta johtuva säteilymäärän vaihtelu on pientä ja näin ollen se todennäköisesti tasaantuu paneelin käyttöiän aikana. Keväällä pienikin muutos lumen sulamisajankohdassa voi muuttaa vuotuista säteilymäärää merkittävästi, jolloin usealla poikkeuksellisella vuodella voi olla huomattava vaikutus paneelin kokonaistuotantoon.

## 6 Johtopäätökset

Tutkimuksessa tutkittiin, kuinka paljon lumi vaikuttaa aurinkopaneelien vuosituotantoon Pohjoismaissa. Tuloksista nähdään, että lumen vaikutus paneelin sähköntuotantoon on merkittävä, sillä lumi vähentää paneelin vuosituotantoa Pohjoismaissa keskimäärin 25 %. Tämän vuoksi vaikutuksen minimointiin on hyvä panostaa. Lumen vaikutuksessa on huomioitavaa, että suurin osa energia häviöstä sijoittuu keväälle maaliskuu- ja huhtikuulle. Esimerkiksi Jyväskylässä menetetyistä säteilystä 71 % on maaliskuu- ja huhtikuusta, jolloin on vain noin 30 % lumisista päivistä. Tämän vuoksi paneelien vuosituotannon maksimoimiseksi olisikin hyödyllisintä keskittyä lumen poistamiseen keväällä.

Lumen ehkäisymenetelmät kaipaavat vielä kehittämistä, mutta toimivalla lumen- ja jäänestopinnoitteella voitaisiin saada lumen vaikutus minimoitua helposti. Toisaalta pitkänajan sääennusteiden parantuessa, myös hyvin ajoitetulla paneelin lämmittämisellä voidaan saada erityisesti keväällä suuri hyöty. Lämmittäessä on kuitenkin tärkeää huolehtia, ettei paneelia vaurioiteta liialla paikallisella lämpiämisellä.

Tässä tutkimuksessa lämpötilan vaikutus paneelin tuotantoon on jätetty huomioimatta, koska vaikutus on vain parin prosentin luokkaa. Lisäksi tutkimuksessa on oletettu, että kaikki lumi pysyy paneelilla, vaikkei tilanne todellisuudessa näin olekaan. Lumen pysymiseen paneelilla vaikuttaa monenlaiset asiat, kuten lumen olemus ja paneelin pinnoite. Siksi paneelille jäävän lumen määrää on haasteellista arvioida, minkä vuoksi olisi hyvä saada alueellisia ja monivuotisia testejä aiheeseen liittyen.





## Lähteet

- [1] Godfrey Boyle. *Renewable energy*. 2nd ed. Power for a sustainable future. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [2] A.E. Becquerel. ”Research on the effects of chemical radiation from sunlight, using electric currents”. *C. R. Acad. Sci.* 9 (1839), s. 145–149.
- [3] *Aurinkoenergian historiaa*. 2016. URL: <http://www.finlumo.fi/aurinkoenergian-historiaa/> (viitattu 24.04.2019).
- [4] *Vuoden 1973 öljykriisi*. URL: [https://fi.wikipedia.org/wiki/Vuoden\\_1973\\_%C3%B6ljykriisi](https://fi.wikipedia.org/wiki/Vuoden_1973_%C3%B6ljykriisi) (viitattu 24.04.2019).
- [5] A. Jaeger-Waldau. ”PV Status Report 2018” (2018). DOI: 10.2760/826496. URL: <https://ec.europa.eu/jrc>.
- [6] A. Jaeger-Waldau. ”PV Status Report 2019” (2019). DOI: 10.2760/326629. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118058>.
- [7] Karoliina Auvinen ym. ”FinSolar: Aurinkoenergian markkinat kasvuun Suomessa” (2016). DOI: 10.13140/RG.2.1.4362.3289.
- [8] Rae Perälä. *Aurinkosähköä*. Toim. Osmo Perälä. Helsinki: Alfamer / Karisto Oy, 2017.
- [9] Peter Würfel. *Physics of Solar Cells*. 2nd ed. From basic Principles to Advanced Concepts. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [10] S. Wenham ym. *Applied Photovoltaics*. 2nd ed. UK: Earthscan, 2007.
- [11] P. Grunow ym. ”Weak light performance and annual yields of PV modules and systems as result of the basic parameter set of industrial solar cells”. *19th PVSEC* June (2004), s. 2190–2193. DOI: 10.1016/B978-012369378-5/50015-6.

- [12] Erlend Andenæs ym. "The influence of snow and ice coverage on the energy generation from photovoltaic solar cells". *Solar Energy* 159. September 2017 (2018), s. 318–328. DOI: 10.1016/j.solener.2017.10.078.
- [13] E.A. Alsema. "Energy requirements and CO2 mitigation potential of PV systems". *Photovoltaics and the Environment* (1998).
- [14] Andrew Blakers ym. "High Efficiency Silicon Solar Cells". *Energy Procedia* 33 (2013). PV Asia Pacific Conference 2012, s. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.033>.
- [15] A.D.J. O'Neill ja DM Gray. "Solar radiation penetration through snow". *Proceedings of UNESCO-WMO-IAHS Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Vol. 1* (1972), s. 229–249. DOI: 10.2500/ajr.2008.22.3247. URL: [http://www.usask.ca/hydrology/papers/O'Neill%7B%5C\\_%7DGray%7B%5C\\_%7D1973%7B%5C\\_%7D2.pdf](http://www.usask.ca/hydrology/papers/O'Neill%7B%5C_%7DGray%7B%5C_%7D1973%7B%5C_%7D2.pdf).
- [16] Tim Townsend ja Loren Powers. "Photovoltaics and snow: An update from two winters of measurements in the SIERRA". *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference* October (2011), s. 003231–003236. DOI: 10.1109/PVSC.2011.6186627.
- [17] Loren Powers, Jeff Newmiller ja Tim Townsend. "Measuring and modeling the effect of snow on photovoltaic system performance". *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference* June 2010 (2010), s. 973–978. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614572.
- [18] Charles Fierz ym. "Modeling short wave radiation penetration into the snow-pack: what can we learn from near-surface snow temperatures?" (2008), s. 204–208. URL: <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:16929>.
- [19] Ali Rahmatmand, Stephen J. Harrison ja Patrick H. Oosthuizen. "An experimental investigation of snow removal from photovoltaic solar panels by electrical heating". *Solar Energy* 171 (2018), s. 811–826. DOI: 10.1016/j.solener.2018.07.015.
- [20] Rob Andrews ja Joshua Pearce. "The Effect of Spectral Albedo on Amorphous Silicon and Crystalline Silicon Solar Photovoltaic Device Performance". *Solar*

- Energy* 91 (maaliskuu 2013), s. 233–241. DOI: 10.1016/j.solener.2013.01.030.
- [21] Agnes Weiss ja Helmut Weiss. ”Photovoltaic cell electrical heating system for removing snow on panel including verification”. *Environmental Science and Pollution Research* 25 (2018), s. 24561–24568. DOI: 10.1007/s11356-017-0251-4.
- [22] Bill Marion ym. ”Measured and modeled photovoltaic system energy losses from snow for Colorado and Wisconsin locations”. *Solar Energy* 97 (2013), s. 112–121. DOI: 10.1016/j.solener.2013.07.029.
- [23] *Ilmatieteenlaitoksen lumitilastot*. URL: <https://ilmatieteenlaitos.fi/lumitilastot> (viitattu 24.04.2019).
- [24] *JRC PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)*. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html) (viitattu 04.03.2019).
- [25] A. Riihelä ym. ”Validation of CM SAF Surface Solar Radiation Datasets over Finland and Sweden.” *Remote Sensing* (2015). DOI: 10.3390/rs70606663.
- [26] *Weathers park - The Typical Weather Anywhere on Earth*. URL: <https://weatherspark.com/> (viitattu 04.02.2020).